

# INTEGRACIÓN ENTRE CIENTÍFICOS, INGENIEROS Y LAS COMUNIDADES AFECTADAS SOBRE INQUIETUDES DEL IMPACTO DE TERREMOTOS Y TSUNAMIS EN PUERTO RICO<sup>1</sup>

Ricardo R. López Rodríguez<sup>2</sup>, Wilson R. Ramírez Martínez<sup>3</sup>, Víctor A. Huérfano<sup>4</sup>,  
Christa von Hillebrandt-Andrade<sup>5</sup>, Ernesto F. Weil Machado<sup>6</sup>

**RESUMEN:** El Terremoto M6.4 del 7 de enero de 2020 en el suroeste de Puerto Rico causó daños en residencias y edificios y generó mucha ansiedad. Las réplicas continuaron ocurriendo en los meses subsiguientes y todavía se sienten, aunque con menos frecuencia e intensidad. Un grupo de investigadores de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez y “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) se dio la tarea de visitar las comunidades que lo solicitaron para orientarlos llevando a cabo charlas comunitarias. Se proveyó información sobre la geología de la zona, los movimientos medidos, peligro de tsunamis, efectos en las estructuras, prospecciones de eventos subsiguientes, y cómo reaccionar ante estos movimientos del suelo. Este artículo resume parte de la experiencia de los integrantes, incluyendo información técnica del evento y contestaciones a algunas de las preguntas más frecuentes que surgieron en las charlas.

**Palabras clave:** ansiedad, daños estructurales, fallas sísmicas, terremotos, tsunamis

## INTERACTION AMONG SCIENTISTS, ENGINEERS AND THE AFFECTED COMMUNITIES ABOUT THE IMPACT OF EARTHQUAKES AND TSUNAMIS IN PUERTO RICO

**ABSTRACT:** The M6.4 earthquake in January 7, 2020 in the Southwest of Puerto Rico caused damage to housing and buildings, and generated anxiety among the residents. The aftershocks were very active in the following months and are still felt, although with less intensity and frequency. A group of researchers from University of Puerto Rico at Mayagüez and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) took over the task of going to the communities that requested their visit to deliver informative talks about the events. These included information on the geology of the zone, details on the ground movements, Tsunami threats, the effects on the structures, what to expect in future events, and how to react to the strong ground movement. This article summarizes part of that group experience, including technical information about the earthquake and answers to some of the most commonly asked questions from the provided lectures.

**Keywords:** anxiety, structural damage, seismic faults, earthquakes, tsunamis

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 30 de noviembre de 2020 y aceptado para publicación el 18 de diciembre de 2020.

<sup>2</sup> Catedrático Jubilado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. Email: ri.lopez@upr.edu.

<sup>3</sup> Catedrático, Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. Email: wilson.ramirez1@upr.edu

<sup>4</sup> Director, Red Sísmica de Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. Email: victor.huerfano@upr.edu

<sup>5</sup> Gerente, “Caribbean Tsunami Warning Program”, NOAA. Email: christa.vonh@noaa.gov

<sup>6</sup> Director y Catedrático, Departamento de Ciencias Marinas, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. Email: ernesto.weil@upr.edu

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, Puerto Rico ha vivido una situación de continua ansiedad. Dos huracanes potentes, Irma y María, impactaron la isla en 2017 y causaron serios daños materiales y más de 3,000 muertes en la isla. Seguidamente, cuando todavía estábamos recuperándonos de las tormentas, una serie de temblores sacudieron el suroeste de la isla por más de tres meses a partir de diciembre de 2019. Para entender las condiciones de los habitantes del suroeste, cuando ocurrieron los temblores, debemos señalar que los huracanes causaron un colapso total de la infraestructura eléctrica y de comunicaciones en la isla, dejando millones de personas en la oscuridad, sin comunicación telefónica e internet. Las carreteras quedaron bloqueadas y miles de familias perdieron sus hogares. Se interrumpió el transporte de gasolina y alimentos y muchos servicios públicos se paralizaron, causando problemas en la dinámica económica de Puerto Rico y mucho miedo y ansiedad en la población. La recuperación después de las tormentas fue mucho más lenta de lo esperado, por ejemplo, la rehabilitación parcial de la infraestructura eléctrica tardó más de ocho (8) meses.

El 28 de diciembre de 2019, la región sur-occidental, todavía en recuperación, fue sacudida por un fuerte temblor de tierra (5.0 M) cuyo epicentro fue en la Falla La Montalva, cerca del pueblo de Guánica, causando miedo y preocupación en la población. Una semana más tarde, en el 6 y 7 de enero, dos fuertes terremotos (5.8 y 6.4 M) sacudieron significativamente la región nuevamente, derrumbando edificios y casas, produciendo daños mayores a la planta eléctrica más importante de la región (Guayanilla), lo que obligó a la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) a un cierre temporero, nuevamente dejando una gran proporción de la población, hospitales y negocios sin electricidad. Dos temblores fuertes (4.8 y 5.2 M) y miles de menor intensidad asociados a la Falla La Montalva y a fallas relacionadas con la parte oeste del cañón submarino de Guayanilla, ocurrieron entre el 7 de enero y el 14 de febrero, manteniendo a la población en estado de alerta, nerviosismo, pánico y ansiedad constante. Debido a esto, mucha gente optó a dormir en las plazas, sin querer volver a sus hogares. Desde 1918, no había ocurrido un terremoto de esta magnitud en la isla, por lo que la gran mayoría de la población no tenía ninguna experiencia con estos movimientos telúricos, y no muchos sabían del terremoto y tsunami de hace más de 100 años.

Los medios de información, especialmente los medios sociales de comunicación comenzaron a difundir información errónea y noticias alarmistas y sensacionalistas sobre la formación de volcanes, el hundimiento de la isla y tsunamis gigantes atravesando la isla de sur a norte, entre otras, incrementando el estado de miedo y ansiedad en la población.

En respuesta a esta situación y a nuestra responsabilidad hacia la comunidad, el alcalde de Cabo Rojo coordinó una conferencia informativa en la plaza del pueblo el 15 de enero, con el resultado que se llenó de público la plaza (más de 800 personas). El Dr. Ernesto Weil, del Departamento de Ciencias Marinas (CIMA), cuya Estación de Biología Marina isla Maguëyes en La Parguera, se encuentra muy cercana al área de los epicentros, con la colaboración de los Dres. Wilson R. Ramírez (Dpto. de Geología, UPRM), Víctor Huérfano (Director de la Red Sísmica de Puerto Rico), Christa von Hillebrandt-Andrade (Gerente de “NOAA Caribbean Tsunami Warning Program”) y Ricardo López (Catedrático retirado del Depto. de Ingeniería Civil, UPRM), tomaron la iniciativa de organizar una conferencia informativa para la comunidad en la sala de conferencia del Hotel Villa Parguera, en la Parguera. El hotel y su personal ofrecieron el espacio físico y apoyo logístico, libre de costo, para llevar a cabo esta actividad.

El objetivo principal de la conferencia fue proveer, mediante presentaciones en PowerPoint, información básica y sencilla, pero con soporte científico, y desmentir y aclarar toda la información errónea y sensacionalista que estaba circulando, de modo de disminuir lo más posible el miedo y estado de ansiedad de la comunidad.

Las charlas se organizaron para presentar la información en una secuencia lógica y fácilmente entendible, explicando el origen de terremotos y tsunamis, lo que estaba ocurriendo en la falla de La Montalva, los problemas estructurales y debilidades de las construcciones típicas de esta región, terminando con las medidas de seguridad y

acciones que cada ciudadano debe conocer para disminuir los riesgos en estas situaciones. Cada presentación duraba unos 15 minutos y al final, se abría una sesión para responder preguntas de los asistentes que, en ocasiones, duraban más de una hora.

La conferencia en La Parguera llevada a cabo el 22 de enero fue un éxito, con más de 200 personas en el salón de conferencia, incluyendo el Alcalde de Lajas y algunos representantes del gobierno del área occidental. Cerca de 50 personas no pudieron entrar al salón por las medidas de seguridad, pero tuvieron acceso a la conferencia, posteriormente vía internet, pues esta fue grabada. Los comentarios generales de los asistentes luego de la sesión de preguntas fueron que gracias a la información dada, ahora entendían mucho mejor lo que estaba ocurriendo y se sentían más tranquilos.

Al terminar la actividad de La Parguera, oficiales del gobierno local en la zona oeste de la isla se acercaron para solicitar nuestra colaboración para dar las charlas en otros pueblos del oeste. En total, el grupo dio cuatro conferencias más en distintos pueblos del oeste [dos en Aguadilla (Fig. 1), una en Moca y otra en San Sebastián] entre el 22 de enero y el 11 de marzo, cuando nos vimos obligados a suspender las conferencias por la pandemia de Covid-19.



**Figura 1: El Dr. Víctor Huérfano ofrece orientación sobre terremotos y tsunamis a la comunidad de Aguadilla, Puerto Rico el 5 de febrero de 2020.**

## **ASPECTOS GEOLÓGICOS ASOCIADOS A LA SISMICIDAD EN EL SUROESTE DE PUERTO RICO**

La sismicidad en el suroeste de Puerto Rico está asociada al régimen tectónico actual en la región noreste de la Placa Tectónica del Caribe (PTCa), la cual es producto de una evolución geológica que comienza en el Jurásico Superior ( $161.2 \pm 4.0$  a  $145.5 \pm 4.0$  Ma). Pindell y Kennan (2009) discuten éste proceso en detalle, incluyendo importantes cambios tectónicos que ocurren en el Cretácico Superior ( $100.5 \pm 0.3$  a  $66.0 \pm 0.2$  Ma) y que son clave para el desarrollo de las condiciones tectónicas actuales en PTCa. Durante ese tiempo geológico, se transforma la interacción entre las Placas Tectónicas de Norte y Sur América (PTNA y PTSA) con PTCa de una zona de subducción (PTNA y PTSA por debajo de PTCa) a una interacción transformante (corrimiento lateral izquierdo) en el noroeste de PTCa y una colisión oblicua (PTNA por debajo de PTCa) en el noreste de PTCa. Ésta colisión oblicua en el noreste de PTCa es clave para la discusión que sigue.

Estudios sísmicos y medidas geodésicas de movimiento en la corteza terrestre (Wang et al., 2019; Kelvin, 2011; Mueller et al., 2010; Mann, 2005; Mann et al., 2002, entre otros) establecen que el carácter de colisión “oblicua” en el noreste de PTCa ha creado una rotura de la litosfera en forma de “microplacas tectónicas” donde se destacan la Microplaca Tectónica de La Española (mPTHi) y la Microplaca Tectónica de Puerto Rico-Islas Vírgenes (mPTPRIV). Vectores producidos por medidas de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) indican que en mPTPRIV está ocurriendo una extensión de la litosfera al oeste (relativo a mPTHi) y sureste (relativo a las Antillas Menores). Características geomórficas en el fondo marino asociado a éstas regiones, como el Cañón de Mona y el Canal de Anegada, en adición a fallas de tipo normal y mecanismos focales de terremotos que indican extensión, reiteran éste diagnóstico.

La velocidad de la colisión oblicua en la región noreste de PTCa con PTNA ha sido medida en 20 mm/año usando GPS (Wang et al., 2019; Kelvin, 2011; Mueller et al., 2010; Mann, 2005; Mann et al., 2002, entre otros). La subducción de la litosfera de PTNA por debajo de PTCa se proyecta a una distancia horizontal de más de 150 km al sur de la Fosa de Puerto Rico y en la región central-sur de Puerto Rico produce terremotos con profundidades aproximadas de 100 km ( $\pm$  30 km). La secuencia sísmica del suroeste de Puerto Rico que comienza a finales de diciembre de 2019 y que produce casi 500 terremotos M3 o más, durante enero del 2020, se caracteriza por terremotos con profundidades menores de 20 km a una distancia de más de 250 km al sur de la Trinchera de Puerto Rico. Esto indica que estos terremotos no están asociados a la subducción de litosfera de PTNA por debajo de PTCa, sino a deformación en la litosfera superior en el límite suroeste de mPTPRIV.

Medidas de GPS reportadas en estaciones de Cabo Rojo (-67.045 W, 17.970 N) y Lajas (-67.189 W, 18.060 N) presentan un movimiento horizontal de la superficie terrestre en direcciones opuestas con una velocidad aproximada de 1.0 a 2.0 mm/año (PRVI18 y CARIB18, PTCa fija). El movimiento se expresa en dirección norte-sur (PRVI18) ó noroeste-suroeste (CARIB18), relativo al Valle de Lajas que se encuentra entre las dos estaciones (Wang et al., 2019). En el suroeste de Puerto Rico, la deformación de la litosfera (< 20 km) se expresa común y consistentemente en fallas normales (extensión) y fallas de corrimiento lateral izquierdo (transformación). Por ejemplo, la actividad sísmica en el Cañón de Guayanilla presenta mecanismos focales que indican extensión (i.e. fallas normales) y en la falla de La Montalva (Roig, 2010), al oeste de la Bahía de Guánica, los mecanismos focales indican transformación y hay características geomórficas que demuestran corrimiento lateral izquierdo. El límite de mPTPRIV está claramente definido en el noroeste por el Cañón de Mona pero en el suroeste es poco evidente. No obstante, la región suroeste de la isla de Puerto Rico ha sido documentada por décadas como un lugar sísmicamente activo con numerosas características geomórficas (terrestres y submarinas) que indican estrés y deformación tectónica, lo que sugiere que el límite de mPTPRIV se encuentra en la región.

Los estudios para caracterizar las orientaciones del estrés (geología estructural), las deformaciones producidas (paleosismicidad y geomorfología) y la sismicidad a nivel local (sismología y geofísica) toman tiempo y representan un trabajo complejo porque en regiones de actividad sísmica hay múltiples factores involucrados que producen numerosas fallas con diferentes características y recurrencia de sismos. No obstante, a nivel regional se pueden hacer caracterizaciones razonables que permiten desarrollar escenarios sobre el potencial de severidad de eventos y peligrosidad asociada a sismos y tsunamis. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) ha trabajado y facilitado esta información desde el comienzo de los hechos discutidos.

Estudios de paleosismicidad en el suroeste de Puerto Rico (Piety et al., 2018; Mann et al., 2005; Prentice y Mann, 2005) han reportado rupturas con recurrencia milenaria en el Holoceno (últimos 11,700 años). Medidas de GPS, mencionados arriba, reportan movimientos de la corteza terrestre en el suroeste de Puerto Rico que son un orden de magnitud menor que los reportados en el límite de placas entre PTCa y PTNA. En resumen, la secuencia sísmica del suroeste de Puerto Rico probablemente representa deformación de la corteza terrestre en forma de fallamiento que produce terremotos con una magnitud más alta que la usual y, que tiene una recurrencia más extensa que la usual, tal vez milenaria. La deformación es producida por el estrés en la litosfera (< 20km) localizada en el límite suroeste de mPTPRIV, que probablemente está localizado al suroeste de la isla de Puerto Rico o áreas submarinas adyacentes.

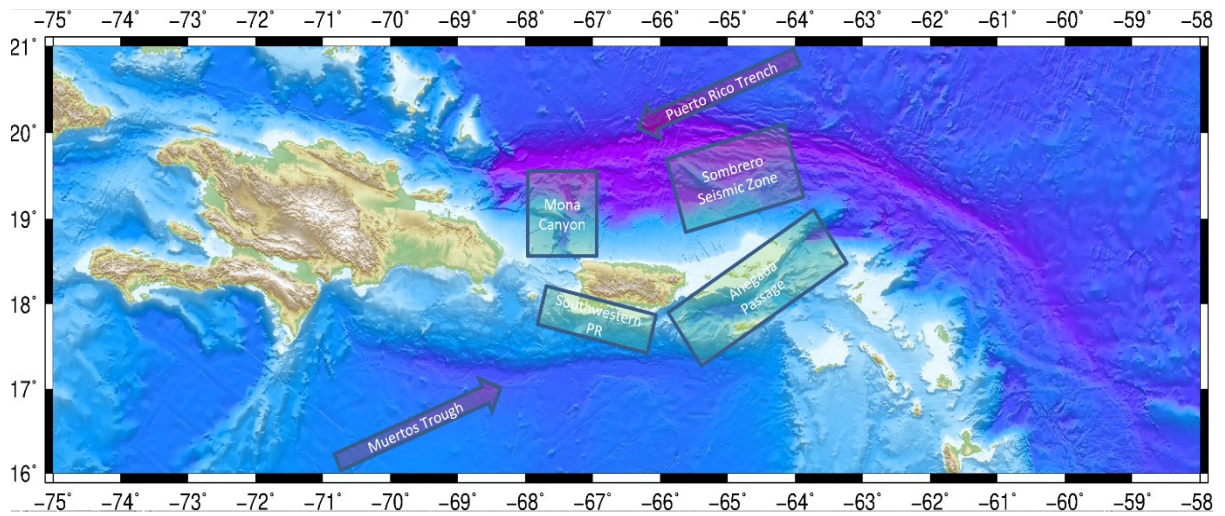
## Descripción de movimientos registrados por la Red Sísmica de Puerto Rico

El archipiélago de Puerto Rico, por su localización geográfica, está expuesto a importante actividad sísmica, dado que estamos cerca de fallas importantes y zonas sísmicas conocidas (Figura 2). En los últimos 500 años, hemos experimentado eventos sísmicos importantes los cuales han causado daño a la infraestructura y a la vida de los habitantes de la Isla, las islas municipios de Vieques y Culebra; así como a los habitantes de las Islas Vírgenes, tanto Estadounidenses como Británicas. Entre los eventos documentados, tenemos los siguientes terremotos cuya magnitud ha sido mayor a 7.0 y han causado daños sustanciales. Tenemos el terremoto de 1670, el cual afectó parte del área centro oeste de Puerto Rico; en 1787 ocurrió un evento que afectó el área noreste de la Isla; en 1867 ocurrió el evento del Pasaje de Anegada, el cual afectó de manera intensa a las Islas Vírgenes de Santo Tomás y Santa Cruz, donde sus efectos fueron apreciables en la región este de Puerto Rico, donde también se observó un tsunami; en 1918 ocurrió el terremoto del Cañón de la Mona, el cual causó gran daño al área oeste de Puerto Rico, siendo el impacto del terremoto de particular importancia en Mayagüez y Aguadilla, y se generó un tsunami de unos 20 pies de altura. Tan reciente como el pasado 7 de enero de 2020, un terremoto de M 6.4 se dejó sentir con toda su energía, intensidad de VIII, en el suroeste de Puerto Rico. Este evento dio paso a una secuencia sísmica, que se ha extendido por 11 meses y ha dejado sobre 12,000 eventos localizados en el área. En la Figura 3, se presenta el catálogo sísmico, tanto pre-instrumental como instrumental, desde que la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) está monitoreando rutinariamente la actividad en la zona de responsabilidad (Puerto Rico e Islas Vírgenes) donde se ha localizado sobre 60,000 eventos (a partir de 1986).

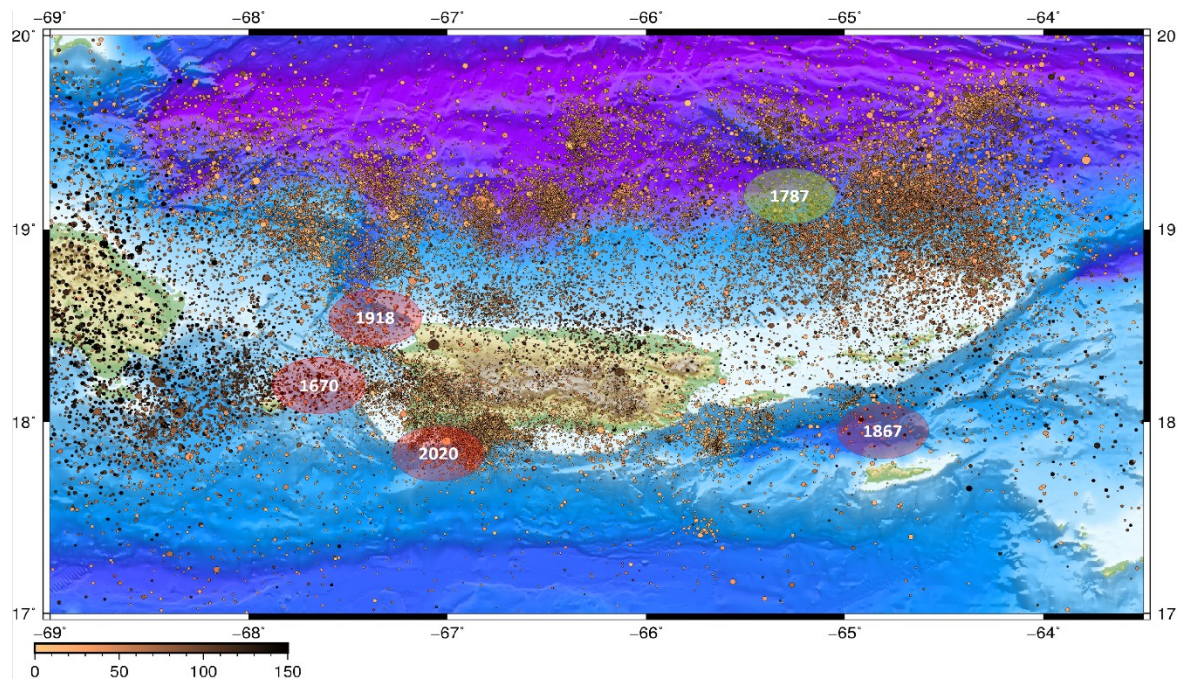
La secuencia sísmica (Figura 4) antes mencionada, inicia el 28 de febrero de 2019, cuando un evento de M4.7 (seguido por un evento de M5.0 el día 29 de febrero) se localiza en la, aún poco conocida, falla de La Montalva. Durante esa semana siguiente la actividad sísmica en el suroeste de Puerto Rico adquirió unos niveles sin precedente desde que la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) inició su monitoreo cotidiano. Era tal la incertidumbre, la preocupación y la ansiedad en la población, que la RSPR en unión a las Oficinas de Manejo de Emergencias, tanto estatal como municipales, activamos un plan de acción para orientar a las comunidades; se realizó actividades masivas, impactando miles de habitantes de los pueblos que estaban siendo afectados por la actividad sísmica: Ponce, Peñuelas, Guayanilla, Yauco, Guánica, Lajas y los pueblos del interior como Adjuntas. Durante esta semana, se venía reportando daños a la infraestructura y mucha problemática emocional en nuestra población. Entonces llega el 6 de enero de 2020, cuando a las 6:32 pm se registra un evento de M5.8 a muy pocas millas del casco urbano del municipio de Guánica; toda esta actividad causó que mucha población decidiera salir de sus casas (algunas afectadas) o se movieran a terrenos abiertos en tiendas de campaña; el evento más intenso (MM VIII) ocurre horas después el 7 de enero a las 04:24am. Este evento se registró en las estaciones sísmicas de todo el Caribe, y generó un tsunami de una amplitud de 2 pulgadas en la estación cercana de Isla Magueyes (Departamento de Ciencias Marinas, del RUM). La Isla fue declarada en estado de Emergencia por las autoridades Locales y Federales.

Un sismo de gran intensidad ( $M > VII$ ) es un evento traumático, ocurre de manera sorpresiva e incontrolable, dado que amenaza la integridad física y psicológica de las personas que lo experimentan. Personal de la RSPR se hizo presente el 8 de enero en el vecino municipio de Guánica, y era latente el estado de desespero en la población, la impotencia de las autoridades y la necesidad de ayuda generalizada. Con el pasar de los días, y dada la continuidad de la secuencia sísmica, fue claro la necesidad de unir esfuerzos con las autoridades a todos los niveles para llevar una voz de confianza a la población. Es por esto que se da paso a la iniciativa de *charlas comunitarias*, donde se une personal científico, ingenieril y de ayuda comunitaria.

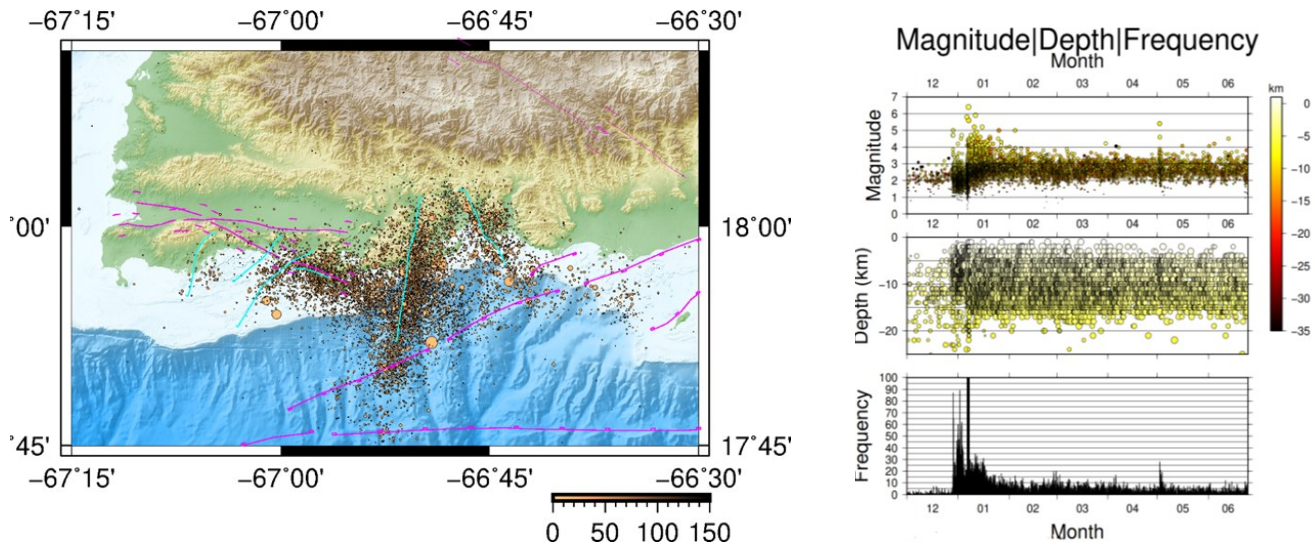
Aún cuando la tierra seguía temblando, durante las semanas posteriores al evento principal, se llevó a cabo estrategias para dar atención a personas en crisis, esfuerzos que continuaron de manera efectiva por diferentes entidades. El primer paso consistió en conocer la magnitud del impacto, evaluar las consecuencias tanto a nivel estructural, del conocimiento científico, y de estrategias psicológicas que pudiesen ayudar a la comunidad. Por tanto, se estableció un plan de acción integral teniendo como norte las necesidades de las comunidades, al menos el que sintieran una mano amiga, una voz de aliento y unos consejos para sobrellevar la situación.



**Figura 2: Fallas cercanas a Puerto Rico.**



**Figura 3: Catálogo de Eventos históricos.**



**Figura 4: Secuencia sísmica de 2019 a 2020.**

### Ejemplos de daños estructurales

Una de las mayores preocupaciones de los asistentes a las conferencias era conocer si su residencia o lugar de trabajo era seguro para resistir terremotos. Además, muchos habían observado grietas en sus residencias y tenían duda de si estas representaban peligro o eran simplemente cosméticas. La charla enfatizó los siguientes puntos:

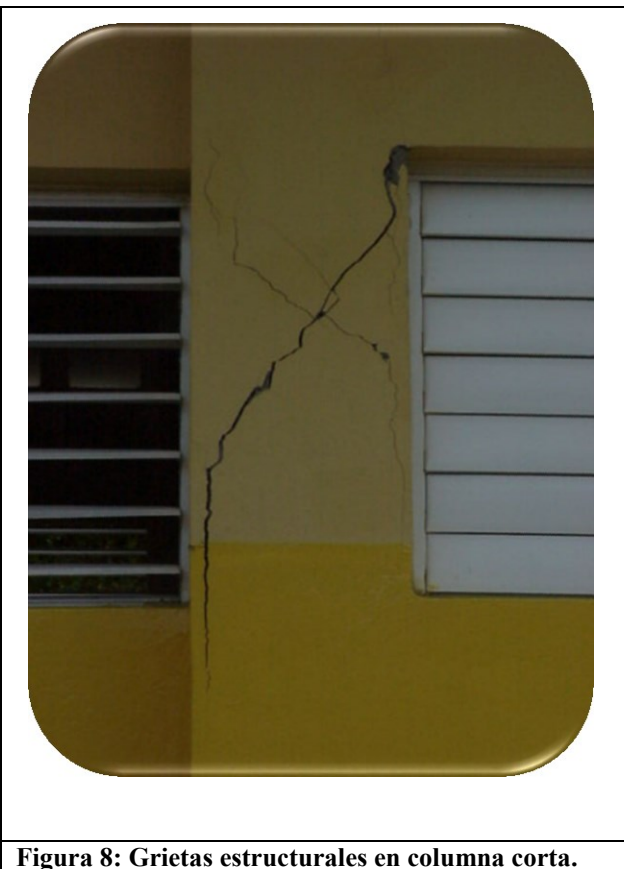
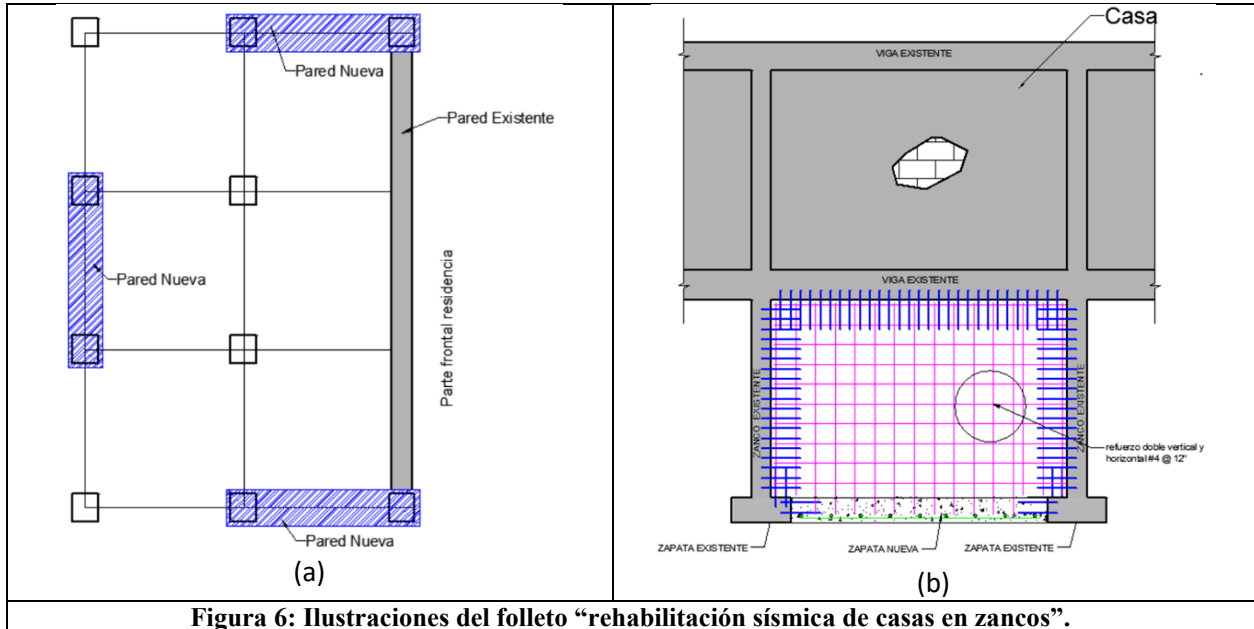
- a. Las fuerzas que se generan en las estructuras están relacionadas directamente al peso (masa) de la estructura y a las aceleraciones inducidas por el terremoto. A mayor peso, mayores fuerzas. La mayoría de las residencias y edificios en Puerto Rico están contruidos de hormigón armado, el cual es un material muy pesado, por lo que estas estructuras tienen que soportar fuerzas muy altas en caso de terremoto. Es sabido que la mayoría de las personas han decidido usar estos materiales porque son muy resistentes a huracanes, los cuales son comunes en el trópico. Parte del objetivo de las charlas fue llevar el mensaje que estas estructuras, aunque algunas estén agrietadas, son capaces de resistir terremotos fuertes si fueron bien diseñadas y/o contruidas.
- b. La gran mayoría de las estructuras no colapsan, aún en terremotos muy fuertes. En datos recopilados en cuatro (4) terremotos ocurridos en Kobe (Japón 1989), Erzincan (Turquía 1992), Luzón (Portugal 1990), y Ciudad de México (México 1985), se observó que menos del 4% de las estructuras, incluyendo aquellas muy antiguas, sufrieron colapso. El resto no colapsaron, y entre 75 y 90% pudieron ser ocupadas luego de ser inspeccionadas después del evento. Esta información le da peso a las recomendaciones de que durante el terremoto las personas deben buscar un lugar para protegerse y no salir del edificio apresuradamente.
- c. Muchos de los daños importantes, incluyendo colapsos, ocurrieron en residencias elevadas en columnas y que no fueron diseñadas por ingenieros o arquitectos profesionales. Se presentaron ejemplos de daños en estas residencias para ilustrar los daños típicos esperados (Figura 5). A los residentes de estructuras similares que no han experimentado terremotos fuertes, se enfatizó que estas estructuras se pueden mejorar. Una forma de fortalecer estas estructuras se detalla en el folleto informativo “Rehabilitación sísmica de casas en zancos”, (Martínez et al 2013). Este se consigue de forma gratuita por internet, en varios sitios. Uno de ellos es el sitio del Municipio de Cabo Rojo, <https://www.caborojopr.net/>. Este folleto fue escrito por investigadores del Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico, ubicado en la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (RUM). El folleto ilustra cómo añadir

paredes de hormigón armado entre las columnas del primer piso para rigidizar y fortalecer la estructura (Figura 6). Se incluyen detalles de dónde y cuántas paredes añadir, el tamaño y refuerzo de las paredes, los nuevos cimientos requeridos, y cómo conectar las paredes nuevas a la estructura existente.

- d. Se discutieron muchas de las grietas típicas observadas en residencias terreras de hormigón armado. Es muy común encontrar separación entre la estructura original y partes que se añadieron luego. Si no se coloca refuerzo en diagonal en las esquinas de las puertas y ventanas, surgen grietas diagonales en estos sitios (Figura 7). Si las grietas no son grandes, no deben ser peligrosas. Igualmente surgen grietas de separación entre los elementos estructurales como vigas y columnas y las paredes adyacentes, típicamente construidas en bloques de concreto. Estas grietas normalmente no son peligrosas, a menos que la pared de bloques quede sin ningún apoyo lateral.
- e. Un estudio realizado en el RUM por el entonces estudiante doctoral Edgardo Vélez (Vélez, 2007) concluyó que las paredes de bloques en residencias de una planta son suficientemente resistentes para prevenir colapso de estas estructuras tan prevalentes en nuestras comunidades.
- f. Las grietas más preocupantes son las grietas inclinadas en elementos estructurales como vigas, columnas o paredes de hormigón armado. Si están presentes, hay que evaluar con más detalle. Un ejemplo de grietas inclinadas (Figura 8) se muestra en las columnas de esta escuela en Puerto Plata (República Dominicana) en 2003.
- g. Las residencias de madera normalmente son muy flexibles y en ellas se sienten bastante fuerte los movimientos del suelo. Éstas residencias tienden a ser más livianas que las de hormigón armado y normalmente se comportan bien a menos que estén muy deterioradas previo al evento.
- h. La mayoría de los edificios multipiso han sido diseñados para resistir terremotos. En Puerto Rico, el Reglamento de Planificación #7 enmendado en 1987 contenía los requisitos estructurales necesarios para diseñar estructuras resistentes a colapso en terremotos y huracanes.







## **Peligro de tsunamis**

Un tsunami es una serie de olas de longitud y período sumamente largos, normalmente generados por perturbaciones asociadas con terremotos que ocurren bajo el fondo oceánico o cerca de él. También pueden ser generados por erupciones volcánicas, los deslizamientos de tierra submarinos, los derrumbes costeros de montañas y el impacto en el mar de un meteorito de gran tamaño. Estas ondas pueden alcanzar grandes dimensiones y viajar por toda la cuenca oceánica, perdiendo poca energía. Se propagan como olas de gravedad normales con un periodo típico de entre 10 a 60 minutos. Al acercarse a aguas someras, las ondas de tsunami se amplifican y aumentan en altura, inundando áreas bajas; y donde la topografía submarina local provoca amplificación extrema de las olas, éstas pueden romper y causar daños importantes. Los tsunamis no guardan relación con las mareas. (Comisión Oceanográfica Intergubernamental, 2019).

El tiempo que tarda llegar el tsunami, depende de la distancia hasta su lugar de origen y la profundidad del mar. En aguas profundas viajan hasta 800 km/hora, la velocidad de un “jet”, pero a medida que se acercan a las costas y la profundidad es menor, viajan mucho más lento, menos de 40 km/hora.

La altura del tsunami va depender de la deformación inicial del cuerpo de agua y la profundidad del mar y las elevaciones en la costa. En caso de un terremoto, mientras más superficial y mayor el desplazamiento vertical en la falla, mayor serán las olas. Sin embargo, en mar profundo, las olas son pequeñas, generalmente imperceptibles, pero a medida que llegan a la costa y se disminuye la velocidad por la menor profundidad, las olas empiezan a apilarse y alcanzan sus máximas alturas. De ahí proviene el nombre “tsunami”, palabra japonesa que significa “ola en puerto”.

El Caribe, por su posición geográfica y geografía, rodeada por contactos entre las placas tectónicas de Norteamérica, Suramérica, el Caribe y Cocos, está expuesta al peligro por tsunamis (von Hillebrandt-Andrade, 2013). Durante los pasados 500 años, se han observado al menos 83 tsunamis confirmados y más de 4,500 personas han perdido la vida a causa de los tsunamis en el Caribe y regiones adyacentes, según NCEI (2020). En Puerto Rico en los pasados 500 años, ha habido cinco terremotos de gran impacto, incluyendo el del 7 de enero de 2020. Dos de estos terremotos generaron tsunamis destructivos. El primero fue en el año 1867 y se originó entre las islas de Santa Cruz y Santo Tomás en las Islas Vírgenes. Se reportaron 40 muertos, una embarcación de la Marina de los EEUU, la cual fue arrojada a la playa, áreas costeras inundadas hasta en el sureste de Puerto Rico. El segundo, mucho más destructivo para Puerto Rico, se generó el 11 de octubre de 1918. Se reportaron olas de hasta 20 pies de altura y unas 140 muertes directas. Desde 1918, se han generado tsunamis destructivos en otros países, como República Dominicana en 1946, pero no han ocasionado daños en Puerto Rico (NOAA, 2020).

Puerto Rico es una isla pequeña rodeada y cruzada por fallas, muchas de las cuales tienen el potencial de generar tsunamis. Uno de los retos mayores del sistema de alerta de tsunamis en Puerto Rico es lo rápido que pueden llegar los tsunamis a la costa después de un terremoto. En 1918 aún se estaba sintiendo el terremoto en Aguadilla y el tsunami había llegado (Reid y Taber, 1919). En cuestión de 40 minutos, el tsunami puede llegar a alcanzar todas las costas.

Hasta mediados de los años 1990, los tsunamis se consideraban un “peligro olvidado” en Puerto Rico. Pero, en 1996, a raíz de una reunión internacional en las Islas Vírgenes, se empezó a crear conciencia de la amenaza que representaba a la vida, propiedad y economía. Los primeros trabajos de modelaje de tsunamis fueron llevados a cabo por Mercado y McCann (1998) cuando simularon el tsunami de 1918. Este trabajo fue seguido por el trabajo doctoral de Huérfano (2003), quien modeló sobre 450 diferentes fuentes sísmicas para tsunamis en Puerto Rico, generando el primer mapa de inundación por este tipo de peligro costero. También, entre el 2000 y el 2004, con fondos de FEMA, el Departamento de Ciencias Marinas de la UPRM y la Red Sísmica de Puerto Rico, establecieron el Programa de Mitigación y Alerta de Tsunamis para Puerto Rico y se hicieron los primeros ejercicios de desalojo por tsunami, se instalaron letreros y se mejoró el sistema de vigilancia.

El Servicio Nacional de Meteorología (SNM) a través de sus centros de alerta de tsunamis tiene la responsabilidad de establecer y emitir la alerta de tsunamis para todo los Estados Unidos. En el 2003 el Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico le fue asignado la responsabilidad de alertar a Puerto Rico e Islas Vírgenes en caso de un peligro de tsunami. Para esto han establecido cuatro productos:

- Aviso - Este es el nivel más alto de alerta de emergencia, se emite cuando hay un peligro inminente de inundación por tsunami. Se recomienda desalojar la zona inundable, moverse a lugares altos y seguir las instrucciones de emergencia.
- Advertencia - Este es el segundo nivel más alto de alerta de emergencia, se emite cuando hay un peligro potencial por un tsunami que puede producir corrientes fuertes u oleaje peligroso.
- Vigilancia - Este es el tercer nivel más alto de alerta de emergencia, se emite cuando ha ocurrido un evento que más tarde (más de tres horas) pueda afectar la zona costera.
- Información - Este es un mensaje informativo relacionado a la ocurrencia de un evento sísmico sin peligro de tsunami. No requiere acción.

En el 2005, después del devastador tsunami del Océano Índico, Puerto Rico fue incluido en el Programa Nacional de Amenaza y Mitigación de Tsunamis (NTHMP) de la NOAA para ampliar los trabajos de investigación, mitigación, educación, planificación, monitoreo e implementar el Programa de “TsunamiReady®”.

El Programa “TsunamiReady” tiene 13 indicadores que tiene que cumplir los municipios costeros para recibir el reconocimiento del SNM (NWS, 2016). Estos indicadores están divididos en tres áreas:

- Mitigación –designar zonas de inundación por tsunami, incluir información de vulnerabilidad y riesgo de tsunami en el plan multi-riesgo de FEMA para la comunidad e instalar la señalización de tsunami.
- Preparación –Producir mapas de desalojo de las áreas propensas a inundación por tsunami, respaldar un esfuerzo de educación pública y continua de tsunamis, proveer información y realizar actividades educativas, conducir ejercicios de desalojo.
- Respuesta – tener un plan operacional de emergencias, incluyendo escuelas en la zona de peligro y un COE, tener métodos confiables y redundantes para recibir y diseminar alertas de tsunamis, tener radios meteorológicos NOAA (“NOAA Weather Radio”) en facilidades críticas y lugares públicos, y conducir ejercicios.

Existe un Comité “TsunamiReady” con representantes del NWS-San Juan, el Programa de Alerta de Tsunamis del Caribe, la Red Sísmica y el Negociado de Manejo de Emergencias y Administración de Desastres de Puerto Rico. Este comité tiene la responsabilidad de verificar que el municipio cumpla con los indicadores.

En el 2006, Mayagüez fue reconocido como la primera jurisdicción “TsunamiReady” del Caribe, y 10 años más tarde, en 2016, habiendo los otros 45 municipios en riesgo haber cumplido con los indicadores del programa, Puerto Rico fue reconocido por el Servicio Nacional de Meteorología como “TsunamiReady”.

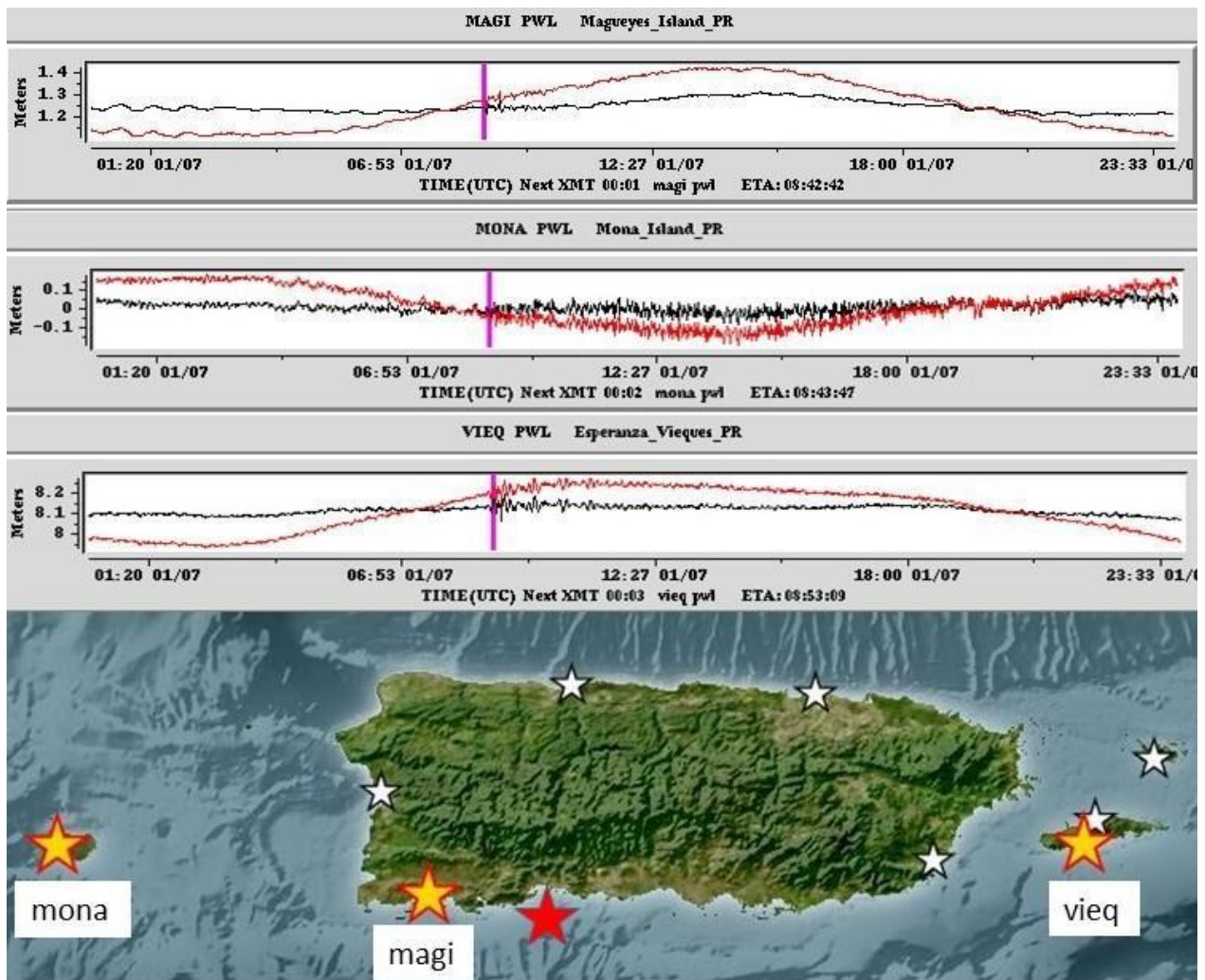
La Red Sísmica de Puerto Rico mediante una subvención del NWS coordina la implementación del programa en Puerto Rico y mantiene la página web con información y mapas actualizados (<http://redsismica.uprm.edu/Spanish/tsunami/programatsunami/prc/>).

Debido a estos antecedentes había una buena conciencia de tsunamis en el 2019 cuando empezó la secuencia sísmica del suroeste. Había un sistema y protocolos de alerta oficial complementado por el empoderamiento de la ciudadanía a reconocer las señales naturales de un tsunami (terremoto tan fuerte que uno difícilmente puede levantarse o quedarse en pie).

El 7 de enero fue la primera vez en 100 años que Puerto Rico se sintiera un terremoto con intensidad más que VII en la escala Mercalli Modificada. Según en el USGS (“Earthquake Hazards Program”, 2020), la intensidad máxima fue de VIII en el área suroeste de Puerto Rico. Con esta intensidad de movimiento, se debería haber activado la alerta personal: Agáchese, Cúbrase y Sujétese y una vez termine el movimiento fuerte y se encuentra en la zona de desalojo de tsunami, desalojar. Según testimonios, algunas personas reaccionaron de esta manera, una vez terminó el movimiento empezaron a desalojar.

A pesar de que la magnitud original del terremoto (6.6) estaba en el umbral de emitir una Advertencia, el PTWC optó por emitir un Boletín Informativo. Debido a la gran intensidad y los cálculos iniciales de magnitud, la Red Sísmica en coordinación con las autoridades estatales, emitieron una advertencia de tsunami para Puerto Rico (salirse del agua/playas) y muchos de los municipios activaron sus sistemas de alerta, incluyendo algunas sirenas. Muchas personas se confundieron, y entendieron que era un aviso y esto conllevó a que miles de personas dentro y fuera de la zona de desalojo, desalojaron.

Sí se registró un tsunami, pero muy pequeño. A los 22 minutos, el mareógrafo de Parguera, seguidos por los mareógrafos de Vieques, Isla Mona, Punta Cana, Saint John y Saint Croix registró un tsunami. La máxima amplitud registrada fue de hasta 2.5 pulgadas (Figura 9). O sea, un nivel que no representaba ningún peligro. Con esta información, el PTWC reconfirmó que no existía peligro por tsunami y la RSPR en coordinación con las autoridades canceló la advertencia de tsunami.



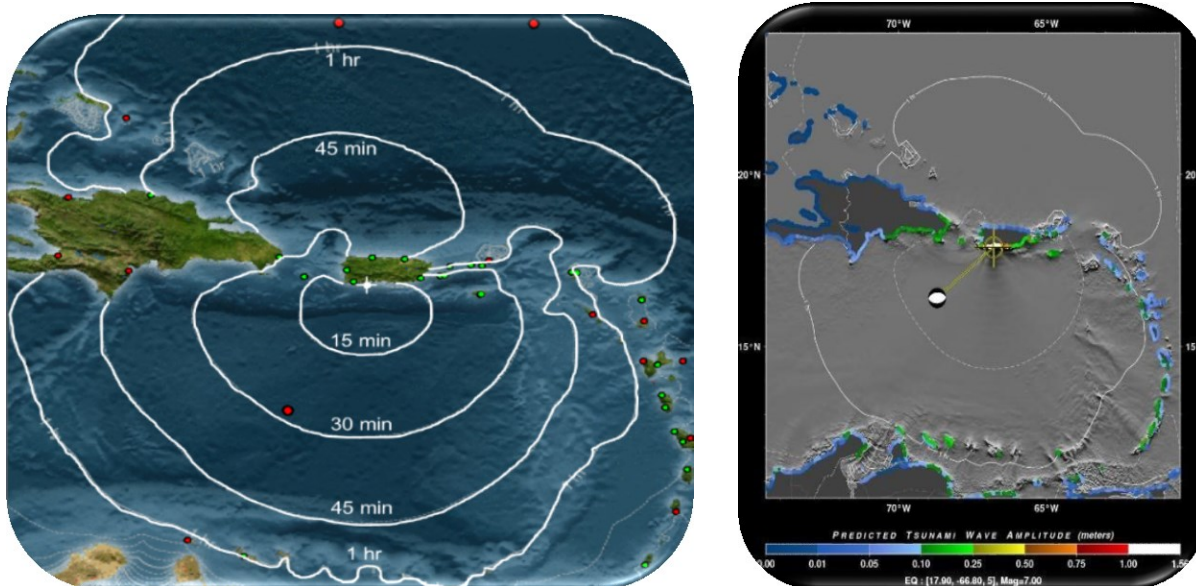
**Figura 9: Registro del tsunami generado por el terremoto del 7 de enero de 2020 en las estaciones mareográficas de Magueyes (Lajas), Isla Mona y Esperanza, Vieques. En rojo es el registro original y en negro el registro restando la marea. En el mapa, las estrellas amarillas representan las localizaciones de los mareógrafos y la estrella roja, el epicentro del terremoto del 7 de enero de 2020.**

Aunque no se generó un tsunami que pudiera causar impacto e inundar zonas costeras, si hubo varias situaciones de inundación costera. La situación de mayor impacto por inundación costera ha sido la comunidad El Faro de Guayanilla. Pero esta inundación fue causada porque el terreno se hundió hasta ocho pulgadas a consecuencia directa del terremoto (Figura 10).



**Figura. 10: Imágenes de la Comunidad el Faro, antes (2019) y después (2020) del Terremoto del 7 de enero de 2020 (Foto 2019 suministrada por Google, Foto 2020 suministrado por Profesor Aurelio Castro, Escuela Graduada de Planificación; Kevian Pérez, Estudiante Graduado, Ciencias Ambientales, Universidad de Puerto Rico).**

Después del terremoto, había aún la preocupación del peligro por tsunami debido a la posibilidad, aún no descartada, que se pudiera generar un terremoto de mayor magnitud. Mientras las autoridades estatales revisaban los planes de respuesta y en especial los puntos de asamblea y refugios, el PTWC también corrió varios escenarios de tsunamis. Según los modelos, y en base a la información de fallas en el Suroeste, se confirmó que terremotos mayores en la región sí podrían generar inundaciones por tsunamis, pero solamente en la costa sur, otras áreas en Puerto Rico donde el tsunami tardaría más de media hora en llegar el peligro era para las playas, puertos y operaciones marítimas (PTWC, com. pers., 2020). Estos modelos solo se basan en tsunamis generados directamente por terremotos, y no incluyeron tsunamis por deslizamientos submarinos independientes o asociados con actividad sísmica (Figura 11).



**Figura 11: Tiempos de viaje de un tsunami generado en el Suroeste de Puerto Rico y a la izquierda mapa con alturas de ola pronosticadas por el PTWC por un terremoto de magnitud 7.0. Franjas costeras con potencial peligro de inundación en blanco.**

A raíz del terremoto del 7 de enero de 2020 y ante el peligro por tsunami existente, son varias las acciones que se están tomando y han sido recomendados para mejorar la resiliencia ante este tipo de evento. La RSPR, como parte del proyecto NTHMP, ha empezado el proceso de revisar los mapas de inundación de tsunamis, esto incluye evaluación de programas para modelar tsunamis y la actualización de las fuentes y el modelo de terreno. Los planes de respuesta a nivel municipal y estatal se han revisado para atemperar los protocolos de activación de alertas. Debido a la confusión con el término de Advertencia en Puerto Rico y otras partes de los EEUU, el NWS está considerando discontinuar este término y sustituirlo con otro, como Aviso de Playas y Puertos Por Tsunami. La situación de COVID-19 realzó la importancia de tomar en consideración los riesgos a la salud en los planes de tsunamis. La educación y simulacros son críticos para mantener a las autoridades y las comunidades listas para responder efectivamente ante una amenaza de tsunami. El programa “TsunamiReady” ha sido clave para que en Puerto Rico se tenga presente esta amenaza.

### LECCIONES APRENDIDAS EN INTERACCIÓN CON EL PÚBLICO

Las lecciones aprendidas fueron principalmente basadas en las preocupaciones generadas por ideas preconcebidas, especialmente sobre las causas de los terremotos. Entre las diez (10) preguntas que eran más recurrentes en las diferentes charlas resaltaban las siguientes:

1. ¿El calor/cambio climático; causa los terremotos?; No existe relación científicamente fundamentada.

2. ¿Por qué “siempre los terremotos/movimientos sísmicos ocurren de noche”?; No es cierto y fue solo casualidad que se sintieron muchas réplicas de noche.
3. ¿Los animales dan aviso?; Puede ocurrir, pero todavía no se puede cuantificar y no es confiable.
4. ¿Cuál es el tamaño máximo de un Tsunami y la magnitud máxima de un terremoto?; En Puerto Rico se podrían esperar olas de tsunami de hasta 20 pies de altura. La escala de terremotos no tiene límite máximo pero en Puerto Rico la magnitud debe estar limitada por el largo de ruptura máximo esperado, que implica magnitud cerca de 8.
5. ¿Cuál es la causa del sonido asociado a los movimientos?; El sonido se genera por la fricción entre los suelos que se desplazan por las ondas sísmicas, cuando estas llegan a la superficie se transmiten por el aire convirtiéndose en ondas de sonido.
6. ¿La isla se iba a partir en dos?; No es cierto.
7. ¿Estaba naciendo un volcán en alguna parte?; La isla es de origen volcánico pero no está activa.
8. ¿El tsunami pasaría sobre toda la isla?; Imposible, los mapas de tsunamis delimitan la zona que podría sufrir inundación, y solo aplica a los pueblos costeros.
9. ¿Por qué hay tanta actividad sísmica en el área de Guánica?; Debido a la cercanía a las fallas activas.
10. ¿Por qué se inundó la comunidad El Faro de Guayanilla?; Debido a que bajó el nivel de un área cercana a la falla.

Por último, cuando enfatizábamos la importancia que sus propiedades fueran diseñadas por profesionales competentes, los asistentes preguntaban ¿cómo se sabe si nuestra casa fue diseñada por un profesional competente?; Nuestra recomendación es que verifiquen si existe un plano de diseño con la firma de un profesional.

## CONCLUSIONES

Esta experiencia de orientación y concienciación a las comunidades fue muy enriquecedora, para los conferenciantes y para los asistentes. La inclusión de Geólogos, Sismólogos, Ingenieros y Biólogos como representantes de la comunidad científica de Puerto Rico y a fines a los intereses de las comunidades presentó una visión integrada fácil de seguir de la información que, junto con la sesión de preguntas, aclaró las dudas de la comunidad y les dejó un conocimiento directo de la situación.

La participación muy amplia de la comunidad en las conferencias confirmó el interés de tener información y datos científicos, y mediante sus preguntas, su capacidad para asimilar la información. Se pudo resaltar que las fallas activas en estos eventos habían sido identificadas en investigaciones previas.

Es la primera vez que se pueden pronosticar y documentar instrumentalmente las réplicas de un terremoto mayor a M6 en Puerto Rico. Esta información servirá para prepararse para eventos futuros.

Los tipos de estructuras que sufrieron colapso o presentaron más daños habían sido estudiados. Hay disponible un folleto informativo para fortalecer estas estructuras sobre columnas.

Hay mapas disponibles delineando las zonas en peligro de tsunami y los lugares de asamblea para las personas que desalojen las zonas de peligro pueden acceder y dado el poco tiempo entre el terremoto y arribo de tsunami la importancia de auto desalojos complementados por información oficial.

Existe mucha inquietud en la población sobre la recomendación de “Agacharse, Cubrirse y Sujetarse”. Esta recomendación ha quedado confirmada en muchos eventos.

Luego de eventos de gran impacto, como el terremoto del 7 de enero, circulan muchos rumores y desinformación. Las comunidades están ansiosas por tener información correcta sobre los peligros naturales y, especialmente, las

medidas de protección. Es una gran oportunidad para llevar la información directamente a los interesados, ayudar a bajar el nivel de estrés y prepararlos para que tomen las decisiones adecuadas que protejan su vida y aumenten su resiliencia. Para los científicos, fue una excelente oportunidad para interactuar y aprender sobre las principales preocupaciones y dudas de las comunidades. Lamentablemente, la amenaza del virus del COVID-19 nos obligó a parar estas charlas que habían sido muy concurridas.

En situaciones futuras de disturbios naturales significativos, como las descritas, es importante y pertinente que los científicos y gobiernos locales hagan un esfuerzo mayor para llevar la información correcta a los habitantes, y para que corrijan inmediatamente la desinformación y sensacionalismo en las redes sociales que impacta emocionalmente a las comunidades afectadas.

## REFERENCIAS

- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. *Glosario de tsunamis*, cuarta edición, 2019. Colección Técnica de la COI, 85. París, UNESCO, 2019 (árabe, chino, español, francés e inglés) (IOC/2008/TS/85rev.4).
- Huérffano, V. (2003). “Susceptibilidad de Puerto Rico ante el efecto de maremotos locales”, PhD disertación, Departamento de Ciencias Marinas, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez.
- Kelvin, D. (2011). “An Updated GPS Velocity Field for Puerto Rico and the Virgin Islands: Constraints of Tectonic Setting and Internal Deformation”, M.S. Tesis, Departamento de Geología, Universidad de Texas en Arlington, Arlington, Texas.
- Mann, P., Calais, E., Ruegg, J-C., DeMets, C., Jansma, P.E., y Mattioli G.S. (2002). “Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations”, *Tectonics*, Vol. 21, No. 6, pp. 7-1; 7-26.
- Mann, P. (2005). “Introduction to the volume: Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas”, *Geological Society of America Special Paper* 385, pp. 1-12.
- Mann, P., Prentice, C.S., Hippolyte, J-C., Grindlay, N.R., Abrams, L.J., y Laó-Dávila, D. (2005). “Reconnaissance study of Late Quaternary faulting along Cerro Goden fault zone, western Puerto Rico, in Mann, P., ed., Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas”, *Geological Society of America*, Special Paper 385, pp. 115-138.
- Martínez Cruzado, José A., López Rodríguez, Ricardo R. y González Avellanet Yvonne, (2013), *Rehabilitación Sísmica de Casas en Zancos*, Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Mercado, A., and McCann W. (1998). “Numerical simulation of the 1918 Puerto Rico Tsunami”. *Natural Hazards*, vol. 18, no. 1, p. 57-76.
- Mondziel, S., Grindlay, N., Mann, P., Escalona, A., y Abrams, L. (2010). “Morphology, structure, and tectonic evolution of the Mona canyon (northern Mona passage) from multibeam bathymetry, side-scan sonar, and seismic reflection profiles”, *Tectonics*, Vol. 29, No. 2, pp. 1-23.
- Mueller, C., Frankel, A., Petersen, M., y Leyendecker, E. (2010). “New seismic Hazard Maps for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands”, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 1, pp. 169-185.
- NOAA National Centers for Environmental Information, Global Historical Tsunami Database, [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml), doi: 10.7289/V5PN93H7 (Accesado el 15 de noviembre de 2020).
- NOAA National Weather Service, 2016. “TsunamiReady® Guidelines”, <https://www.weather.gov/media/tsunamiready/resources/2015TRguidelines.pdf> (Accesado el 15 de noviembre de 2020).



- Piety, L.A., Redwine, J.R., Derouin, S.A., Prentice C.S., Kelson, K.I., Kilinger, R.E., y Mahan S. (2018). "Holocene Surface Ruptures on the Salinas Fault and Southeastern Great Southern Puerto Rico Fault Zone, South Coastal Plain of Puerto Rico", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 108, No. 2, pp. 619–638.
- Pindell, J.L. y Kennan, L. (2009). "Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame, an update, in James, K.H., Lorente, M.A., and Pindell, J.L., eds., *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*", *Geological Society of London*, Special Publication 328, pp. 1–55.
- Prentice, C.S. y Mann, P. (2005). "Paleoseismic study of the south Lajas fault: First documentation of an onshore Holocene fault in Puerto Rico, in Mann, P., ed., *Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas*", *Geological Society of America Special Paper* 385, pp. 215-222.
- Reid, H. (1919). "The Porto Rico Earthquakes of October–November, 1918", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Seismological Society of America, 9 (4): 95–127
- Roig-Silva, C.M. (2010). "Geology and Structure of the North Boquerón Bay-Punta Montalva Fault System", M.S. Tesis, Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- USGS Earthquake Hazards Program, 2020. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70006vll/executive> (Accesado el 16 de noviembre de 2020).
- Vélez Vélez, Edgardo, (2007). "Experimental Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Wall Houses Loaded in their Weak Direction", PhD disertación, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Von Hillebrandt-Andrade, Christa, (2013). "Minimizing Caribbean Tsunami Risk", *Science*, Vol. 341, pp. 966-968.
- Wang, G., Liu, H., Mattioli G.S., Miller, M.M., Feaux, K., y Braun, J. (2019). "CARIB18: A Stable Geodetic Reference Frame for Geological Hazard Monitoring in the Caribbean Region", *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 680, pp. 1-29.